

10 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND** 3

REC'D 06 MAR 1998

WIPO PCT

**Bescheinigung****PRIORITY DOCUMENT**

Das Institut für Halbleiterphysik Frankfurt (Oder) GmbH  
in Frankfurt, Oder/Deutschland hat eine Patentanmeldung  
unter der Bezeichnung

"Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor"

als Zusatz zur Patentanmeldung 196 52 423.7

am 6. Dezember 1997 beim Deutschen Patentamt eingereicht.

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue  
Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patent-  
anmeldung.

Die Anmeldung hat im Deutschen Patentamt vorläufig das Symbol  
H 01 L 29/737 der Internationalen Patentklassifikation erhal-  
ten.

München, den 19. Januar 1998

Der Präsident des Deutschen Patentamts

Im Auftrag

Sleck

zeichnen: 197 55 979.4

## **Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor**

Die Erfindung bezieht sich auf einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach Patentanmeldung DE 196 52 423.7.

Neben der Verwendung von Galliumarsenid zur Herstellung von Höchstfrequenztransistoren finden auch Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren in hochfrequenten Bereichen infolge der geringeren Herstellungskosten zunehmend Anwendung. Solche Transistoren bestehen meist aus einer Schichtenfolge Silizium-Kollektorschicht, p-dotierte Silizium-Germanium-Basissschicht und Emitterschicht.

Die deutsche Offenlegungsschrift DE 43 01 333 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung integrierter Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren, bei dem eine Kollektorschicht, eine Basissschicht, eine Emitterschicht und eine Emitteranschlußschicht mittels eines einzigen unterbrechungsfreien Prozesses abgeschieden und gleichzeitig dotiert werden. Dieses Verfahren zur Herstellung hochfrequenztauglicher Transistoren hat den Nachteil, daß eine weitere Erhöhung der Dotierung der Basis mit Fremdatomen eine bei entsprechender Temperatur stattfindende Dotandenausdiffusion, d. h. eine Verbreiterung des Basisgebiets zur Folge hätte. Eine Dotandenausdiffusion hat einerseits eine nichtkonstante Transistorfertigung und andererseits eine Verringerung der Kollektor- und Emitterströme zur Folge. Somit ist eine Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften von Transistoren auf diesem Wege nicht

möglich. Ebenfalls wird durch die Verbreiterung der dotierten Gebiete eine weitere Strukturverbreiterung begrenzt.

Die japanische Patentanmeldung JP 5 102 177 beinhaltet einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor, dessen Basis mit 5% Kohlenstoff zur Kompensation der durch Germanium eingebrachten mechanischen Spannungen versetzt ist. Solche hohen Kohlenstoffkonzentrationen führen jedoch zu einer starken lokalen Gitterdeformation, die unter anderem die HF-Tauglichkeit der Transistoren einschränkt.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor vorzuschlagen, bei dem die Ausdiffusion des Dotanden des Basisgebiets um mehr als 50% gegenüber herkömmlichen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren reduziert wird. Derartige Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren besitzen eine erhöhte Transitfrequenz, eine erhöhte maximale Schwingfrequenz und/oder ein verringertes Rauschmaß je nach Anforderungen und Einsatzzweck. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, die Borausdiffusion aus der Silizium-Germanium-Schicht aufgrund punktdefektgestützter Diffusionsbeschleunigung zu unterbinden, um im Skalierungsbereich von 0,4  $\mu\text{m}$  Stegbreite und kleiner HF-Eigenschaften ohne Verluste zu erhalten. Dadurch sollen im Vergleich zu größeren Strukturen gleiche Transit- und maximale Schwingfrequenzen erreicht werden.

Diese Aufgabenstellung wird durch die nachfolgende Erfindungsdarlegung gelöst.

Auf eine reine Siliziumoberfläche findet eine einkristalline Abscheidung entsprechend dem gewünschten Transistorprofil statt. Der erfindungsgemäße Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor enthält in mindestens einer der drei Einzelschichten des Transistors,

nämlich der Emitterschicht oder der Basisschicht oder der Kollektorschicht, in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise ein Element der vierten Hauptgruppe. Hergestellt wird die Halbleiteranordnung von Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren mittels Epitaxieverfahren, z. B. durch Gasphasenepitaxie oder Molekularstrahlepitaxie. Durch die der Epitaxie nachfolgenden technologischen Verfahrensschritte kommt es zu Defekten, z. B. Zwischengitteratomen im Halbleiterkristall, die eine Diffusion von Gitterfremdatomen, z. B. Dotanden, begünstigen. Ein wie bereits ausgeführtes, in die Epitaxieschicht eingebrachtes, elektrisch nicht aktives Material bindet diese Defekte und verringert die Diffusion des Dotanden. Die durch das Einbringen eines elektrisch nicht aktiven Materials, vorzugsweise Kohlenstoff, hervorgerufene Gitteränderung ist dabei kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$ . Die Ausdiffusion des Dotanden verringert sich, was eine Verbreiterung des Basisgebiets einschränkt. Damit lassen sich hochfrequenztaugliche Transistoren auf zwei Wegen herstellen: Die Dotierungsdosis des Basisgebiets wird erhöht und/oder die Basisbreite wird verringert. In jedem der möglichen Fälle erhöht sich die Konzentration des Dotanden im Basisgebiet des Transistors auf einen Wert zwischen  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  bei Verwendung von Bor als Dotand.

Damit verringert sich der Widerstand der inneren Basis. Ausgangspunkt für die Herstellung eines erfindungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors ist die übliche Herstellung eines vorbehandelten Silizium-Substrats. Zuerst wird Silizium zur Herstellung der Kollektorschicht aufgedampft. Anschließend wird beim weiteren Siliziumaufdampfen zusätzlich Germanium eingebracht und mittels Gitterfremdatomen dotiert. Als Dotand findet vorzugsweise Bor Verwendung. Durch diesen Verfahrensschritt wird die Basis hergestellt. Nach dem Abschalten des Zuflusses von Germanium und dem Dotierstoff wird die Emitterschicht durch weiteres Aufdampfen von Silizium hergestellt. Während mindestens

einem der bisher aufgeführten Verfahrensschritte wird ein elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise Kohlenstoff, in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  während der Herstellung der epitaktischen Schicht hinzugefügt, wobei die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$  infolge der geringen Konzentration des elektrisch nicht aktiven Materials ist. Geringe zusätzliche Gitterverspannung bedeutet keine zusätzliche Quelle von möglichen Gitterdefekten. Zur Herstellung der epitaktischen Schicht finden CVD-Verfahren oder MBE-Verfahren Anwendung. Nach der Epitaxie findet die übliche Weiterprozessierung bis zur Herstellung des endgültigen erfindungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors statt. Das Produkt aus Germaniumkonzentration in der Basisschicht und Breite der Basisschicht von Kollektor bis Emitter beträgt bei erfindungsgemäßem Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor zwischen 50 Atom-prozent  $\cdot \text{nm}$  und 2000 Atomprozent  $\cdot \text{nm}$ . Die Breite der Basisschicht von Kollektor bis Emitter liegt etwa zwischen 5 nm und 60 nm, vorzugsweise zwischen 35 nm und 40 nm. Die Konzentration des Germaniums in der Basisschicht liegt etwa zwischen 8% und 30%, vorzugsweise zwischen 20% und 28%.

Die Merkmale der Erfindung gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich allein oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen schutzfähige Ausführungen darstellen, für die hier Schutz beansprucht wird. Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden im folgenden näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1      schematischer Schichtaufbau eines Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors

Fig. 2 Stufen des Verfahrens zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten für einen Silizium-Germanium-Heterobipolartansistor

Fig. 3 schematischer Schnitt durch einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor

Fig. 4, 5, 6 Konzentrationsverläufe von Germanium im Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren

In Fig. 1 ist der Schichtaufbau eines erfindungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors, bestehend aus einem dotierten Silizium-Substrat 1, einer undotierten Silizium-Kohlenstoff-Kollektorschicht 2, einer dotierten Silizium-Germanium-Kohlenstoff-Basisschicht 3 und einer undotierten Silizium-Kohlenstoff-Emitterschicht 4, dargestellt. Der gesamte Schichtaufbau des Transistors inklusive Dotierung des Basisgebiets mit Bor wird mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt.

Gleichzeitig wird bei der Epitaxie - in diesem Ausführungsbeispiel - während der Herstellung aller drei Einzelschichten, der Kollektorschicht, der Basisschicht und der Emitterschicht, Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  zugegeben. Dies entspricht einer Kohlenstoffkonzentration zwischen 0,0015% und 1,5%. Dadurch wird eine mögliche Bordiffusion signifikant verringert, so daß die Dotandenausdiffusionsgebiete 5 im Vergleich zu herkömmlichen Transistoren dieses Typs verkleinert werden. Durch erfindungsgemäße Einfügung von Kohlenstoff verringert sich die Diffusionslänge von Bor um mehr als 50% gegenüber der Diffusionslänge, die ohne Hinzufügung von Kohlenstoff auftritt. Es kommt zur Ausbildung eines sehr steilen Borprofiles. Die dadurch verringerte Basisweite hat eine geringere Basislaufzeit zur Folge. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Transistfrequenz und der Erhöhung der maximalen Schwingfrequenz bzw. einem verringerten

Rauschmaß des erfindungsgemäßen Transistors. Eine Realisierung kleinerer Transistorstrukturen ist ebenfalls möglich.

Eine weitere Verbesserung der Hochfrequenztauglichkeit erfindungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors wird durch Erhöhung der Borkonzentration zwischen  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  in der Basisschicht 3 erreicht.

Zur Herstellung eines solchen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors werden folgende in Fig. 2 dargestellte Verfahrensschritte durchgeführt: Zuerst wird ein vorbehandeltes Silizium-Substrat in einem Verfahrensschritt  $A_0$  hergestellt. Daran schließen sich die Schritte

- A Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Kollektorschicht,
- B Siliziumaufdampfen und zusätzliches Einbringen von Germanium und Dotanden zur Herstellung der Basisschicht und
- C Abschalten von Germanium und Dotierstoff und Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Emitterschicht

an, wobei während mindestens einem der Verfahrensschritte A bis C Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut wird und die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$  ist.

Nach der Epitaxie findet eine übliche Weiterprozessierung D statt bis zur Herstellung eines erfindungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors.

Fig. 3 zeigt einen schematischen Schnitt durch einen derart hergestellten Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor. Auf einem hochdotierten Substrat 31 aus Silizium sind durch Epitaxie der undotierte Silizium-Kohlenstoff-Kollektor 32, der undotierte Silizium-Kohlenstoff-Emitter 33 und die mit Bor in einer Konzentration zwischen  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  dotierte Basis 34 aus Silizium, Germanium und Kohlenstoff aufgewachsen. Weiterhin beinhaltet die Figur die entsprechenden Kontaktgebiete 35 sowie ein Implantgebiet 36. Die Konzentration des Kohlenstoffs in der epitaktischen Schicht beträgt zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .

Die Figuren 4 bis 6 zeigen Konzentrationsverläufe von Germanium im Silizium erfindungsgemäßer Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren. Die Verläufe haben eine rechteckige, dreieckige oder trapezartige Form. In allen Diagrammen ist auf der Abszisse der Basisbereich durch die Werte  $x_1$  und  $x_2$  begrenzt. Die Ordinate stellt den prozentualen Verlauf der Konzentration des Germaniums dar.

Beim Transistor mit rechteckförmigem Germaniumkonzentrationsverlauf nach Fig. 4 beträgt die Breite der Basisschicht 30 nm. Die Konzentration des Germaniums in der Basisschicht beträgt etwa konstant 22%. Durch dieses Transistorprofil werden bevorzugt hohe Stromverstärkungen und gute dynamische Eigenschaften erreicht.

Beim Transistor mit dreieckförmigem Germaniumkonzentrationsverlauf nach Fig. 5 beträgt die Breite der Basisschicht 40 nm. Die Konzentration des Germaniums in der Basisschicht beträgt in der Mitte der Basisschicht, wo sie ihren Maximalwert erreicht, etwa 26%. Dieses Transistorprofil ermöglicht die Einstellung sehr hoher Early-Spannungen. Des weiteren gestattet dieses Transistorprofil die Einprägung eines Driftfeldes, um die Basislaufzeit der Minoritätsträger zu verringern.



Beim Transistor mit trapezförmigem Germaniumkonzentrationsverlauf nach Fig. 6 beträgt die Breite der Basisschicht 35 nm. Die Konzentration des Germaniums in der Basisschicht steigt von der Kollektor- bzw. Emitterseite des Transistor linear von etwa 10% auf 22% an. In diesem Ausführungsbeispiel werden durch das Transistorprofil sowohl eine hohe Stromverstärkung als auch eine hohe Early-Spannung, verbunden mit einem Driftfeld zur Verringerung der Basislaufzeit, erreicht.

Bei zunehmender Skalierung wird eine Verbreiterung der Kontaktgebiete durch die Verhinderung der Borausdiffusion durch Kohlenstoff unterbunden, so daß im Skalierungsbereich von 0,4  $\mu\text{m}$  Stegbreite und kleiner HF-Eigenschaften ohne Verluste erhalten bleiben. Auch bei hier geringen Strömen werden im Vergleich zu größeren Strukturen gleiche Transit- und Maximalfrequenzen erreicht.

In der vorliegenden Erfindung wurde anhand konkreter Ausführungsbeispiele ein Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor erläutert. Es sei aber vermerkt, daß die vorliegende Erfindung nicht auf die Einzelheiten der Beschreibung in den Ausführungsbeispielen eingeschränkt ist, da im Rahmen der Patentansprüche Änderungen und Abwandlungen beansprucht werden.

## Patentansprüche

1. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor mit einer Silizium-Kollektorschicht, einer dotierten Silizium-Germanium-Basisschicht und einer Silizium-Emitterschicht nach Patentanmeldung 196 52 423.7, **dadurch gekennzeichnet**, daß ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise ein Element der vierten Hauptgruppe, in mindestens einer der drei Einzelschichten des Transistors, nämlich der Emitterschicht und/oder der Basisschicht und/oder der Kollektorschicht, in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut ist, die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner  $5 \cdot 10^{-3}$  ist und das Produkt aus Germaniumkonzentration in der Basisschicht und Breite der Basisschicht von Kollektor bis Emitter zwischen 50 Atomprozent · nm und 2000 Atomprozent · nm liegt.
2. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Breite der Basisschicht von Kollektor bis Emitter zwischen 5 nm und 60 nm, vorzugsweise zwischen 35 nm und 40 nm liegt.
3. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Konzentration von Germanium in der Basisschicht zwischen 8% und 30%, vorzugsweise zwischen 20% und 28% liegt.

4. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Germaniumkonzentrationsverlauf in der Basisschicht der Form eines Rechtecks, eines Dreiecks oder eines Trapezes entspricht.
5. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach einem oder mehreren der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Silizium-Germanium-Basisschicht mit Bor dotiert ist und die Borkonzentration zwischen  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  liegt und die Konzentration des eingebauten Kohlenstoffs als zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material kleiner als  $5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  ist.

## **Zusammenfassung**

Die Erfindung bezieht sich auf einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor.

Die Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren besitzen eine erhöhte Transitfrequenz, eine erhöhte maximale Schwingfrequenz und/oder ein verringertes Rauschmaß je nach Anforderungen und Einsatzzweck.

Auf eine reine Siliziumoberfläche findet eine einkristalline Abscheidung entsprechend dem gewünschten Transistorprofil statt. Der Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor enthält ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material. Hergestellt wird die Halbleiteranordnung von Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren mittels Epitaxieverfahren. Ein in die Epitaxieschicht eingebrachtes, elektrisch nicht aktives Material bindet Herstellungsdefekte und verringert die Diffusion des Dotanden. Damit lassen sich hochfrequenztaugliche Transistoren auf zwei Wegen herstellen: Die Dotierungsdosis des Basisgebiets wird erhöht und/oder die Basisbreite wird verringert.



